# 压水堆严重事故一体化分析程序开发规范与评价方法研究

左嘉旭[1]，安婕铷[1*]，石兴伟[1]，宋维[1]，高新力[1*]，靖剑平[1]，庄少欣[1]

生态环境部核与辐射安全中心，北京，100082



**摘要:** 为研究压水堆严重事故一体化分析程序开发规范，为严重事故一体化分析程序开发提供必要的参考。本文基于当前国内相关法规要求和规范、软件开发法规标准体系、核安全分析与设计软件开发规范及要求、核安全分析及设计软件评价要求，研究了压水堆严重事故一体化分析程序开发过程中相关规范体系，在此基础上，对比和建议了严重事故程序开发的标准体系，以及质量保证、验证与确认的规范，初步建立了严重事故程序开发的标准体系要求。在已有的和正在开展的核动力厂安全分析软开发与件评价工作的基础上，初步建立了严重事故程序开发的标准体系，对压水堆严重事故一体化分析程序开发规范做了初步的建议。并在已有程序评价的实践基础上，讨论了严重事故程序的评价要求及其中各方面的重点。

**关键词:** 严重事故；严重事故一体化分析程序；程序开发；标准规范

**中图分类号:** （请查阅后补充） **文献标志码:** A **doi:**

## 1 引 言

严重事故是涉及核电厂条件下多个复杂过程的事故工况，如图 1 所示。严重事故属于核电厂安全分析中的一项必要内容，用于严重事故分析的程序包括具体现象分析程序和一体化分析程序。

严重事故一体化分析程序主要模拟核电厂自堆芯损坏至安全壳失效的事故序列进程和响应，也就是反应堆冷却剂系统、安全壳以及最为重要的源项相关的响应。国外主流的严重事故一体化程序包括 MELCOR（美国 SNL）、MAAP（美国 EPRI）、ASTEC（法国 IRSN 和德国 GRS）等。根据核安全法律法规要求，用于核电厂安全分析的程序应当满足相关的法规要求，必须评价和认可。因此，针对严重事故一体化分析程序开发与评价、质量保证、验证与确认等内容开展规范和研究将有效提升软件质量和评价深度。

**收稿日期:** yyyy-mm-dd; **修改日期:** yyyy-mm-dd

**基金项目:** 国家重点研发计划资助（2019YFB1900701）

**作者简介:** 左嘉旭 (1980—), 男 (汉族), 河北, 正高级工程师, 博士, 现主要从事核电厂安全分析与评价方面的研究, E-mail: zuojiaxu@chinansc.cn

**通信作者:** 高新力， Email: gaoxinli@chinansc.cn；安婕铷，Email: anjieru@foxmail.com

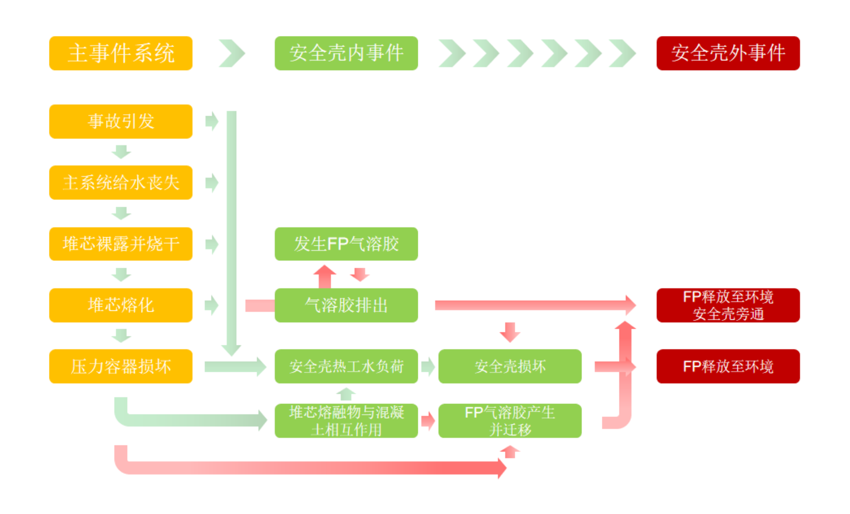



图 1　　严重事故涉及的主要过程和现象

Fig. 1 The main processes and phenomena involved in serious accidents

目前国际上已有的得到广泛应用的严重事故一体化分析程序包括 ASTEC、MAAP、MELCORE、SAMPSON、SOCRAT 等。严重事故系统性分析程序 ASTEC 由法国 IRSN 针对轻水堆开发，可以模拟从始发事件到放射性核素释放至安全壳外的整个严重事故过程中的核电厂行为，能够模拟压力容器内、外的严重事故现象[1]。模块化事故分析程序（MAAP）由美国 EPRI 开发和泄漏后果估计方法（MELCOR）由美国 NRC 是广泛使用的整体响应分析程序[2]。核电厂事故分析程序（SAMPSON）由日本应用能源研究所开发，可进行反应堆内熔融物冷却的三维数值模拟研究[3]。SOCRAT/V3 由俄罗斯开发，可用于模拟气溶胶粒子通过管道或风管系统传播的行为和评估气溶胶颗粒的沉积，可用于在真实紧急情况下对含有 137Cs 放射性核素的放射性气溶胶通过气管的运输进行模拟[4]。

国内开发的严重事故分析的软件有 MOSAP、3DTMCOR、IVRAM、SPIRE、PCCSAP-3D 等。其中 MOSAP 由西安交通大学开发，3DTMCOR 由中山大学开发，IVRAM 由中国核动力研究设计院开发，SPIRE 由上海核工程研究设计院有限公司开发，PCCSAP-3D 由清华大学开发[5-11]。

目前，由于开发时间早，开发机构经验丰富，在计算结果上也得到了一些试验的验证，因此国外开发的严重事故分析软件使用较为广泛。而国内对于严重事故的软件更注重于应用计算，软件开发正逐步开展。总体而言，目前国内外针对严重事故一体化分析程序展开的计算、应用等方面的研究相对充分，但是对于严重事故一体化分析程序开发和开发规范、评价要求的研究，国内外仍具有较大发展空间。

文章基于当前国内相关法规要求和规范、软件开发法规标准体系、核安全分析与设计软件开发规范及要求、核安全分析及设计软件评价要求；分析了目前核安全分析软件评价的方法及基本要求，软件评价过程中的关键重点内容和要求，已评价软件的评价准则等内容；从而研究了压水堆严重事故一体化分析程序

开发的规范要求。

建立了严重事故程序开发的标准体系要求，对比和建议了严重事故程序开发的标准体系，以及质量保证、验证与确认的规范要求。在已有程序评价的实践基础上，讨论了严重事故程序的评价要求及其中各方面的重点。

## 2 严重事故分析程序开发规范及要求

### 2.1 法规要求和规范

明确程序特点以更加准确地定位研究对象，首先总结核电厂严重事故安全分析程序的特点，然后分析审评用的严重事故安全分析软件的特别要求。

(1) 核电厂严重事故安全分析程序的特点

对应于核安全安全分析的特点和法律法规要求，用于安全分析的软件具有明确的专用特点，从而区别于通用软件。由于严重事故的复杂性和综合性，对于核电厂严重事故一体化分析软件在具有安全分析软件的特点之外，还具有其自身的要求。其特点具有总结如下：

- 法规要求严格，必须确保正确性和可靠性；
- 软件专用性强，普遍性和通用性有限；
- 用途单一，适用性局限；
- 物理模型和计算方法复杂；
- 使用经验参数复杂，且对结果影响敏感；
- 需要论证计算结果的不确定性及敏感性；
- 必须进行验证和确认，验证和确认工作困难且周期长；
- 涉及专业繁多，程序计算内容和逻辑复杂；
- 严重事故机理研究、软件开发、工程验证同时开展；
- 软件开发周期质量保证要求更加严格；
- 软件开发团队人员素质要求高，人员结构要求完整、稳定。

对于专门用于审评用的严重事故安全分析软件具有以上所述的特点的同时，还具有以下区别：1）应用人员为核安全审评机构；2）只用于安全分析评价，而不用于设计优化；3）对于关键事故，注重于分析评价安全裕度极限；4）软件使用范围更加广泛，具有较为广泛的堆型适用性。

(2)核安全法规要求

在我国核安全导则 HAD102/17[12]中 4.6.1 中有明确规定可安全分析程序的内容和其功能。其中，严重事故一体化分析程序的功能描述为“模拟自堆芯损坏至安全壳失效的事故序列进程”。

在核安全法规 HAF 102[13]和核安全导则 HAD 102/17 中，对于应用于安全分析的软件进行了规定和要求。其要求主要集中在以下几个方面：进行验证与确认工作，包括所用的计算机程序、分析方法和分析模型；开展程序、模型的不确定性分析；对于程序、模型的开发和试验、验证工作必须制定标准并实施；软件开发、数学模型建立应具有质量保证大纲，并实施；也规定了安全分析所涉及的程序范围和用途。

(3)软件开发法规标准体系

严重事故一体化分析程序的开发属于软件开发的一种，其开发规范标准也必须符合软件开发相关的标准体系规范。目前软件工程行业，已有较完善的标准体系。其中国际标准化组织、我国的国家标准和美国电气与电子工程师协会，对于我国开展软件开发标准化的实施具有重要作用。具体信息如表 1 所示[14]。

我国软件工程标准体系包含了软件管理、过程、技术类标准，软件质量类标准，工具、方法、数据类标准和通用类标准，其中，软件管理、过程、技术类的标准是体系中体量较大的主要部分。

**表 1　　软件开发法规标准体系主要参照简介**

| 体系名称 | 体系简介 | 标准内容 |
|---|---|---|
| 国际标准化组织 ISO(Intemational Scandards 0rganization) | 该机构建立的“计算机与信息处理技术委员会”，负责与计算机有关的标准化工作。 | 发布 70 多项各种类型的软件工程标准，包括通用类型、过程类型、产品类型、操作工具类型、技术类型、资源类型和数据资料类型的标准等。 |
| 中国软件工程标准 | 以 ISO 和 IEEE 标准为基础，先后制定 30 多项国家标准，并逐步形成了我国软件工程标准化体系。 | 在我国通用软件行业里，国家标准主要是 GB8566《信息技术 软件生存周期过程》，其中明确了软件设计、编码、测试、集成、验证等内容的要求。GB 8567-88《计算机软件产品开发文件编制指南》，其中规定了文件的编制指导和各种文件的内容要求等。 |
| 美国电气与电子工程师协会（IEEE） | 其制定的一些标准直接被定为美国国家软件工程标准。许多国家也以 IEEE 软件工程标准为基础。 | IEEE 软件工程知识体系框架包括：软件需求、软件设计、软件构造、软件测试、软件维护、软件配置管理、软件工程管理、软件工程过程、软件工程工具和方法、软件质量以及其它相关学科知识领域等。 |

通过对比不同标准体系的结构，可见对于软件开发，标准可根据不同的流程进行分类；也可根据不同的目的进行分类，如通用类型、过程类型、产品类型、操作工具类型、技术类型、资源类型和数据资料类型的标准等。但这些都会包括以下阶段的划分：需求、设计、构造、测试、维护、配置管理、工程管理、质量保证、工程过程、工具方法等阶段。根据不同行业对于软件质量和可靠性的要求不同，从而对于不同开发阶段由更加具体的要求和标准。

对于严重事故一体化分析程序的开发标准，可根据软件工程的要求，建立需求、设计、构造、测试、维护、配置管理、工程管理、质量保证、工程过程、工具方法等阶段。对于需求分析、物理模型、质量保证、验证与确认等过程需要格外关注，并建立根据具体的管理和实施要求。特别是质量保证和验证与确认方面。

### 2.2 质量保证

对于核安全分析软件开发中质量保证的评价活动主要包括：

– 确立质量保证评价需求；

– 根据评价需求和软件描述制定质量保证评价的说明；

– 在说明的基础上形成质量保证评价计划；按照评价计划进行质量保证评价；最终形成质量保证评价结论。

对严重事故一体化分析程序开发过程中质量保证的评价同样需要符合上述活动内容。通常，质量保证评价主要通过文件审查和文件核查的方式来完成。

根据质量保证评价的要求核重点，严重事故一体化程序开发过程中的质量保证需要关注并体现以下几个方面：

– 质量保证大纲内容的完整性。

– 评价模型的设计过程。

– 文件管理程序和执行情况。

– 配置管理软件和执行情况。

– 软件开发中使用的工具评定情况。

– 制定相关措施，以保证当出现故障、错误、缺陷和偏差等不符合时，能及时发现并纠正。

– 对评价模型开展独立的第三方评定，开展相关的验证工作。

– 确保评价模型的文件覆盖评价模型开发与评估过程的所有要素，一般包括：评价模型需求说明、评价模型方法说明、验证和分析相关文件、用户手册、用户指南和评估报告等。

– 保证开发人员与测试、验证人员的相对独立性。

### 2.3 验证与确认

严重事故一体化分析程序的验证与确认（V&V）是核安全分析程序开发过程中最重要的工作之一，也是工作量和难度最大的工作。

**表 2　严重事故程序的验证与确认**

| V&V 阶段 | 活动 | 目标 | 任务 |
|---|---|---|---|
| 概念阶段 | 严重事故一体化分析程序结构设计和需求分析。 | 验证需求的分配，确认解决方案，确保没有采纳错误的方案 | 包括概念文档评价、需求分配分析、可追踪性分析、危险分析及风险分析 |
| 需求阶段 | 严重事故一体化分析程序需求 | 确保需求的正确性、完备性、准确 | 包括可追踪性分析、需求评价、接口分析、系统测试和验证计 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| | 分析。 | 性、可测试性和一致性 | 划的 V&V、确认计划 V&V、配置管理评估、危险分析及风险分析 |
| 设计阶段 | 严重事故一体化分析程序结构设计和详细设计 | 明确需求的要求已正确、准确和完备的转化到设计中，且没有引入非预期的特征 | 包括可追踪性分析、软件设计评价、接口分析、模块 V&V 测试计划生成和验证、集成 V&V 测试计划生成和验证、V&V 测试设计生成和验证、危险分析及风险分析 |
| 实现阶段 | 严重事故一体化分析程序编码和测试 | 证明程序设计是软件需求的正确、准确和完备的转化，且没有引入非预期的特征 | 可追踪性分析、源代码和源代码文档评价、接口分析、V&V 测试用例生成和验证、V&V 测试规程生成和验证、模块 V&V 测试执行和验证、危险分析及风险分析 |
| 测试阶段 | 严重事故一体化分析程序测试、集成、合格性测试、系统集成和系统合格性测试 | 确保通过集成测试、系统测试和验收测试使软件需求和分配给软件的系统需求得到满足 | 可追踪性分析、验收 V&V 测试规程生成和验证、集成 V&V 测试执行和验证、系统 V&V 测试执行和验证、验收 V&V 测试执行和验证、危险分析及风险分析 |
| 安装和检验阶段 | 严重事故一体化分析程序安装和验收 | 验证和确认在目标环境下软件安装的正确性 | 安装配置审核、安装检验、危险分析、风险分析及 V&V 最终报告生成 |
| 应用对象的确认阶段 | 严重事故一体化分析程序对于应用的确认 | 确认程序对于应用对象、应用范围和相关分析的内容的适用性 | 包括确认矩阵分析、确认用例适用性分析、程序适用性确认、物理模型适用性确认、参数和建模适用性确认等 |

V&V 工作需要伴随软件的全生命周期开展进行，并且持续时间长，工作内容多，工作量大且工作情况复杂。严重事故一体化分析程序的验证与确认要求应与安全分析软件的 V&V 要求一致，因此在开发阶段，验证与确认也需要明确以下关键工作和关键过程任务，包括独立性，管理过程，获取过程，供应过程，开发过程，运作过程，维护过程等要求。对于严重事故程序的完整的开发过程的验证与确认可开展的内容见表 2。

核安全分析软件对于“应用对象的确认”要求极为严格，由此，严重事故的 V&V 过程中，应用对象的确认将是最重要的内容。

需要根据特定对象的严重事故进程和现象建立响应的严重事故过程中物理现象的重要度排序，再结合软件的需求和功能建立确认矩阵，并根据确认矩阵中的内容，选择、分析确认用例的适用性和合理性。进一步，完成程序适用性确认、物理模型适用性确认、参数和建模适用性确认等。



## 3 严重事故一体化分析程序评价

软件评价一般包含功能需求、理论模型、软件确认、敏感性及不确定性分析、软件验证、质量保证[15]。严重事故一体化分析程序的评价工作，也应该符合相关规范。基于核安全法律法规要求，鉴于已开展的软件评价工作，结合严重事故一体化分析程序特点和核安全法规对于严重事故分析结果的要求，讨论严重事故一体化分析程序评价的要求和方法。

(1) 功能需求评价

每个软件的功能需求不同，其功能也不完全一致，但软件的功能必须满足其所有需求的要求。确认程序的需求与功能是否匹配，程序的功能是否能够模拟应用对象特定事故中的所有现象。明确软件在功能、接口及其他各方面的需求等，以保证按照软件的设计开发按照实际的需要进行。

对于严重事故一体化分析程序的功能和应用范围，评价重点如下：

–功能的合理性；

–应用范围的正确性；

–以及与应用对象的符合性。

一般认为，严重事故一体化分析程序主要功能特性包括：

①用于严重事故的整体分析，模拟压水堆核电厂总的响应，包括反应堆冷却剂系统、安全壳以及最重要的源项相关的响应，以合理的精度评估事故进程及后果。

②能够对事故进行连贯分析，需要各种现象模拟模型和参数进行耦合计算，且对计算速度也有一定要求。

③可通过用户自定义的参数和边界条件，计算重要的过程或现象。

④应对源项进行足够精度的估算，其计算结果可支持二级概率安全分析，用以评估严重事故情景的风险。

⑤事故序列计算过程中，模型能够体现重要的物理现象和过程，能够模拟专设安全设施和严重事故中的操作员动作、规程。

⑥对于重要物理现象的识别，重点评价重要物理现象筛选的完整性、物理现象排序方法的合理性、以及物理现象排序结果的正确性。

⑦关键的物理过程包括：堆芯降级，再淹没，下封头熔融物行为，一回路和二回路的完整性，压力容器失效和熔融物释放，熔融堆芯-混凝土相互作用，熔融物可冷却性，蒸汽爆炸，氢气燃烧和爆轰，安全壳和设备的动力学行为，安全壳的热工水力学，压力容器中熔体喷射和安全壳直接加热，安全壳和底板力学行为，堆内释放，在一回路和二回路系统中的转移，安全壳的气溶胶行为，碘化学等，其中每个过程中包括不同的物理现象和情景。

评价过程中，需要确认软件的需求与功能的匹配性，软件模拟的主要参数或现象需要满足应用对象设计与安全分析的需求，软件在功能、接口及其他各方面的合理性，并要确认软件的设计开发按照实际的需要进行。

(2) 理论模型评价

对于理论模型应重点评价：理论模型是否正确，理论模型的来源是否可靠，理论模型的形式与系数是否适用于应用对象，理论模型是否经过充分验证，且验证范围是否覆盖应用对象的参数取值范围等。另外，

还需分析软件理论模型是否能够描述所有需求中所要求的物理过程和现象。

典型的严重事故一体化分析程序的典型理论模型包括以下几个方面，一、二回路热工水力、安全壳热工水力、堆芯熔化、下封头熔池行为、堆芯释放、源项、同位素、剂量、熔融物与混凝土相互作用、可燃气体、系统与控制等。其中每一个方面再根据需要模拟和计算的内容再具体化为相应的模型。

由于目前对于严重事故现象、机理的认识仍在不断发展，因此再理论模型的评估方面，需要关注模型的来源、具体形式、适用条件和模型的正确性。同时关注理论模型的产生方法，以及其对应的试验条件、试验情况、数据分析情况和假设条件等。

严重事故一体化程序涉及的分析过程、分析现象繁多，且需要具有连续分析能力，因此其理论模型的完整性必须与程序的需求和功能相一致，必须覆盖需求功能中包括的过程和现象。

(3) 软件确认评价

软件确认的评价应重点关注每一项功能实现所需理论模型确认的完整性和充分性，完整性即功能实现所需的所有理论模型全部被确认，充分性即功能实现所需所有理论模型的确认范围能够完全覆盖软件应用范围。

严重事故一体化分析程序的确认需要建立详细的确认矩阵，同时明确确认矩阵的建立过程、方法、逻辑的合理性和正确性。确认矩阵必须覆盖软件中所有需要分析的物理现象和包含的物理模型，这些现象与模型应来源于软件所针对的应用对象。确认矩阵中，还需要明确应用的确认基准例题、试验和算例。需要分析确认用例对于应用对象的适用性和参数范围覆盖性，同时还需要详细考虑对于严重事故分析结果影响较大的因素，例如材料效应、事故触发序列等。

参考 MAAP、ASTEC、MELCOR 程序的确认矩阵，严重事故一体化分析程序的确认中至少需要包括一二回路热工水力、堆芯降级、裂变产物释放、气溶胶输运、压力容器机械失效、熔池传热、熔融物行为、安全壳直接加热、安全壳热工水力、熔融物与混凝土相互作用、源项和剂量分析、氢气燃烧等。具体确认用例可采用国际合作组或者知名机构认可或发布的试验、基准例题等。

严重事故一体化分析程序的确认数据通常可以包含试验数据、核动力厂运行数据、国内外基准题、解析解等。由于严重事故现象的复杂和试验、测量的难度，用于确认的试验数据除了必须适用于应用对象以外，试验数据的可信度尤为重要。因此结合试验方的能力、试验开展时间、试验质量保证、试验报告完整性、试验结果分析准确性等因素综合判断。

目前已有的核电厂发生的严重事故数据及其有限，这些数据可用于严重事故一体化分析程序的验证，但是对于其确认过程，需要进一步分析比较三哩岛核电厂堆型和福岛核电厂堆型与应用对象堆型的异同之

处，再进一步分析其确认可用性。

由于对严重事故认知的局限性和其复杂性，对于严重事故分析程序确认结果，可以从趋势、系统响应、计算偏差、保守度等多方面评价确认数据与软件计算结果的对比情况，对于计算结果的不合理之处或者明



## 参考文献（References）


[1] 陈美兰,陈鹏. 基于ASTEC程序的严重事故产氢关键参数影响研究[J]. 核科学与工程, 2022,42(2):408-415.

[2] LUXAT, DAVID L., KALANICH, DONALD A., HANOPHY, JOSHUA T., et al. MAAP-MELCOR Crosswalk Phase 1 Study[J]. Nuclear Technology: A journal of the American Nuclear Society, 2016, 196(3): 684-697.

[3] 薛峰, 袁明豪, 张建, 等. 反应堆内熔融物冷却的三维数值模拟研究[J]. 原子能科学技术, 2019, 53(7): 1255-1263.

[4] ARUTYUNYAN, R. V., PRIPACHKIN, D. A., DOLGANOV, K. S., et al. Assessment of Parameters of Radioactive Aerosol Release Through Air Duct System Using the SOCRAT/V3 Code[J]. Nuclear Technology: A journal of the American Nuclear Society, 2018, 203(1): 92-100.

[5] 巫英伟, 张亚培, 陈荣华, 等. 反应堆严重事故一体化分析程序研发进展[J]. 中国基础科学, 2021, 23(3): 28-33,58.

[6] LI R, YU J. Development of PCCSAP 一 3D Code for passive containment: models of noncondensable gases, aemsoIs and fission products[C]. 2013 21st International Conference on Nuclear Engineering. American Society of Mechanical Engineers Digital Co Uection, Chengdu, 2014.

[7] GRANDJEAN C, HACHE G. A state-of-the-art review of past programmes devoted to fuel behaviour under loss-of-coolant conditions. part 3. cladding oxidation. re8istance to quench and post-quench loads[R]. IRSN Report SEMCA, 2008.

[8] 向清安, 关仲华, 邓纯锐, 等. AP1000 IVR三层熔融池结构评价分析[J]. 核动力工程, 2013, 34(6): 83-87.

[9] WANG J, T1AN W X, ZHANG Y P, et a1. The development of module in-vessel degraded severe accident analysis code MIDAC and the relevant research for CPR 1000 during the station blackout scenario[J]. Progress in nuclear energy, 2014, 76: 44-54.

[10] VASIUEV A D, STUCKERT J. Application of thermal hydraulic and severe accident code SOCRAT/V3 to bottom water reflood experiment QUENCH-LOCA-0[J]. Nuclear engineering and design, 2012, 246(4): 175—184.

[11] 曹臻, 王佳赞, 郭宁, 等. 三层熔池结构IVR分析程序开发及验证[J]. 原子能科学技术, 2018, 52(5): 149-156.

[12] 国家核安全局. 核动力厂安全评价与验证[D]. 核安全导则 HAD 102/17, 2006.

[13] 国家核安全局. 核动力厂设计安全规定[D]. 核安全法规 HAF 102, 2016.

[14] 李刚, 董火民, 杨子江, 韩红强. 软件工程标准化现状与分析[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2007, 第39卷增刊, 73-77.

[15] 国家核安全局. 核动力厂安全分析用计算机软件评价指南[D]. 2022.

# Study on the Developing Standard and Review Requirement of Integrated Analysis Code of PWR Severe Accidents

Zuo Jiaxu, An Jieru*, Shi Xingwei, Song Wei, Gao Xinli*, Jing Jianping, Zhuang Shaoxin,

*Nuclear and Radiation Safety Center, Ministry of Environmental Protection, Beijing 100082, China；*

**Abstract:** It provides a necessary reference for the study of MPWR serious accident integration analysis program development standard and the development of serious accident integration analysis procedure. Based on the current domestic regulatory requirements and regulations, software development regulations, software development, nuclear safety analysis and design software evaluation requirements, studied in this paper, suggested the standard system, quality assurance, verification and confirmation, and preliminarily established the standard system of serious accident program development. Based on the practice of existing procedure evaluation, the evaluation requirements of serious accident procedure and its focus are discussed. On the basis of the existing and ongoing soft development and component evaluation of safety analysis of nuclear power plant, the standard system of the development of serious accident procedures has been preliminarily established, and preliminary suggestions have been made for the development specification of integrated analysis procedures for serious accidents of pressurized water reactor.

**Key words**：Serious accidents, Integrated analysis procedure for serious accidents, Program development , Standards



**Received date**：yyyy-mm-dd； **Revised date**：yyyy-mm-dd

**Foundation item**：National Key Research and Development Program (2019YFB1900701)

1) E-mail: zuojiaxu@chinansc.cn

**Corresponding author**(option): Gao Xinli, Email：gaoxinli@chinansc.cn; An Jieru, Email：anjieru@foxmail.com